

高能级强夯处理晋中深厚湿陷性 黄土地基的试验研究

马鹏兵¹, 徐晓², 曹静远³

(1. 山西建投城市运营集团有限公司, 山西太原 030013; 2. 山西省勘察设计研究院有限公司, 山西太原 030013;
3. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西西安 710055)

摘要: 为评价 16 000 kN·m 能级强夯处理深厚湿陷性黄土地基的效果, 在晋中某建筑工程场地内进行了试夯试验, 开展了地面高程观测、探井取样、室内试验、动力触探试验。试验检测结果表明: 单击夯沉量随着夯击次数的增加逐渐降低, 随着夯击遍数的增加, 夯沉量趋于平稳所需击数减少; 经过强夯处理后, 终夯面下 11 m 深度范围内, 干密度提高了 9.4%, 压缩模量提高了 150.6%, 孔隙比降低约 22.5%, 压缩系数降低 21.7%, 湿陷系数均小于 0.015, 地基土湿陷性基本消除; 不同深度土层的动力触探击数介于 4.2~13.3 击, 平均击数为 10 击。试夯试验结果可为晋中地区深厚湿陷性黄土场地的强夯处理及施工提供参考。

关键词: 高能级强夯; 深厚湿陷性黄土; 湿陷系数; 孔隙比; 压缩模量; 动力触探

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)S2-0019-07

Experimental study on high energy level dynamic compaction treatment of deep collapsible loess foundation in Jinzhong

MA Peng-bing¹, XU Xiao², CAO Jing-yuan³

(1. Shanxi CIG City Operation Group Co., Ltd., Taiyuan 030013, Shanxi, China;

2. Shanxi Survey Design Research Institute Co., Ltd., Taiyuan 030013, Shanxi, China;

3. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China)

Abstract: To evaluate the efficacy of 16 000 kN·m energy level dynamic compaction in treating deep collapsible loess foundation, a series of trial compaction tests were conducted at a construction site in Jinzhong. These tests included ground elevation observation, exploratory well sampling, indoor tests, and dynamic penetration tests. The results show that the settlement of single click compaction gradually decreases with the increase of compaction times. Additionally, with the increase of compaction times, the required number of blows for the compaction settlement to stabilize decreases. Following intensive compaction treatment, within an 11 m depth range below the final compaction surface, several significant improvements were observed: dry density increased by 9.4%, compression modulus increased by 150.6%, void ratio decreased by approximately 22.5%, compression coefficient decreased by 21.7%, and the coefficient of collapsibility reduced to values below 0.015. This effectively eliminated the collapsibility of the foundation soil. Furthermore, the number of dynamic penetration blows of soil layers at different depths is between 4.2 and 13.3, with an average of 10 blows. These test results serve as valuable references for the design and execution of dynamic compaction treatments for collapsible loess in Jinzhong.

Key words: high energy level dynamic compaction; deep collapsible loess; coefficient of collapsibility; void ratio; compression modulus; dynamic penetration test

0 引言

湿陷性黄土是在一定压力下受水浸湿,土结构迅速破坏,并产生显著附加下沉的黄土,属特殊性土。我国湿陷性黄土堆积厚度大,以甘肃、陕西、山西三省发育最为典型,分布连续,工程危害大,其中山西黄土的工程性质与陕西、甘肃等又有明显的差异^[1-2]。在湿陷性黄土场地上开展工程建设,如何消除黄土湿陷性,提高土体工程性质,是工程中关注的焦点问题^[3-4]。

近年来,随着我国黄土地区开发建设步伐加快,城市扩容增大,大量基础工程建设兴起。强夯法也因其施工简单、速度快和效果好等优点被广泛采用^[5-7]。强夯法作为湿陷性黄土地区常用的地基处理方法,适用于处理地下水位以上、含水量10%~20%且平均含水量低于塑限含水量1%~3%的湿陷性黄土地基^[8]。然而,随着工程实践发现,大部分地区湿陷土层厚度超过10 m,有些地区甚至超过20 m,造成湿陷处理难度越来越大,湿陷消除越来越严格。现行规范处理深度有限,难以满足设计要求。规范^[9]中的最高能级为12 000 kN·m,有效加固深度最深约为10 m,规范^[8]中的最高能级为8 000 kN·m,有效加固深度最深约为8.5 m。目前,

在湿陷性黄土中开展强夯试验研究的强夯能级范围大部分在10 000 kN·m内^[10-12],对于10 000 kN·m能级以上的报道还较少。

本次以晋中某湿陷性黄土场地工程建设为依托,开展了16 000 kN·m高能级强夯相关试验研究,获得了处理前后地基土的物理力学性质指标及湿陷系数,并分析其变化规律,最后对本次强夯处理效果进行评价,证明了本工程强夯参数选用是可行的,同时也为类似地区其他工程提供了借鉴。

1 项目概况

项目地块呈倒梯形,总用地面积约80 000 m²,场地内拟建建筑为12栋25~27层的钢筋混凝土结构住宅楼、地下车库及单层或两层配套用房等。场地地貌单元为黄土丘陵区,场地地形起伏较大,地面标高为846~863 m,高差约为17.0 m,场地北侧分布有一条东西向冲沟,沟深约10.0~15.0 m,沟宽约30.0 m。场地较为开阔,周边建筑物距离较远。试夯区位置如图1所示,强夯处理区域分为高度强夯区(主楼位置16 000 kN·m)、中度强夯区(地库位置8 000 kN·m),施工之前以12号楼作为16 000 kN·m试夯区。



图1 试夯区位置示意图

Fig. 1 Location of compaction trial test area

试夯区地层剖面如图2所示,本工程场地所处地貌单元为黄土丘陵,天然地基土的主要物理力学性质指标统计如表1所示。拟建场地总体东高西低,地基处理范围内的主要地层自上而下依次为:第四

系全新统人工堆积层(Q_4^{ml}),以第①层素填土的层底为界;第四系上更新风积层(Q_3^{el}),以第②层湿陷性粉土的层底为界;第四系中更新风积层(Q_2^{el}),以第③层湿陷性粉质黏土的层底为界;第四系中更

新统冲、洪积层 (Q_2^{alpl}), 以素填土、湿陷性粉质黏土、粉质黏土、砂土为主。各土层性质分述如下:

第①层: 素填土 (Q_4^{ml}), 褐黄色, 以粉质黏土、粉土为主组成, 含少量砖块、砖屑、煤屑、植物根系等, 软-可塑状态, 结构松散, 土质不均。堆积年代小于 10 年, 欠固结, 呈高压缩性。

第②层: 湿陷性粉土 (Q_3^{col}), 褐黄色, 含云母、煤屑、氧化铁、氧化铝、白色钙质菌丝及钙质结核等。虫孔发育, 具湿陷性, 湿陷性程度中等-强烈。该层呈稍湿、稍密状态, 具中等压缩性。实测标贯击数 7.0~11.0 击, 平均 8.8 击。

第③层: 湿陷性粉质黏土 (Q_2^{col}), 褐黄-褐色, 可塑状态, 含云母、氧化物等, 混有粉土、细砂、钙质结核, 局部夹砂土透镜体, 无摇振反应, 稍有光泽, 韧性及干强度中等, 具中压缩性。具湿陷性, 湿陷程度轻微-严重。

第④层: 粉质黏土 (Q_2^{alpl}), 褐黄-褐红色, 可塑状态, 含云母、氧化物等, 混有粉土、细砂、砾石, 局部夹砂土透镜体, 无摇振反应, 稍有光泽, 韧性及干强度中等, 具中压缩性。

第⑤层: 粉质黏土 (Q_2^{alpl}), 褐红色, 可塑状态, 含云母、氧化物等, 混有粉土、细砂、砾石, 局部夹砂土透镜体, 无摇振反应, 稍有光泽, 韧性及干强度中等, 具中压缩性。

根据勘察结果可知, ②~③层为湿陷土层, 深度介于 3.5~24.0 m, 湿陷系数介于 0.010~0.085, 湿陷程度中等-严重, 湿陷下限深度为 24.9 m, 湿陷量为 318.0~597.6 mm。自重湿陷量 A_{zs} 为 136.5~267.0 mm, 属于自重湿陷性场地, 湿陷等级为 II 级(中等)。要求消除 11 m 范围内的黄土湿陷性, 剩余自重湿陷量不应大于 70 mm。

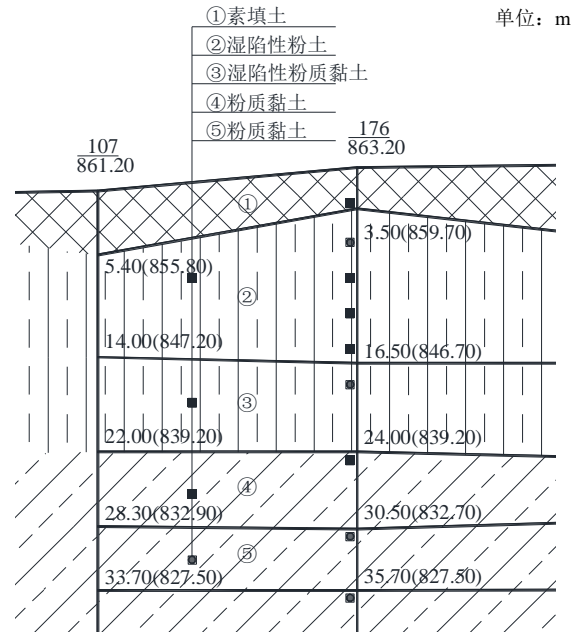


图 2 试夯区的地层剖面图

Fig. 2 Stratigraphic profile of the compaction trial area

表 1 天然地基土的主要物理力学性质指标统计表

Table 1 Statistics of main physical and mechanical property indices

指标	含水量 w /	湿密度 ρ /	干密度 ρ_d /	饱和度 S_r /	孔隙比	压缩系数 a_{v1-2} /	压缩模量 E_{s1-2} /	
	%	(g/cm ³)	(g/cm ³)	%	e	MPa ⁻¹	MPa	
②湿陷性粉土	最大值	19.1	2.16	1.79	89.9	0.869	0.406	9.80
	最小值	11.4	1.64	1.47	38.0	0.803	0.165	4.02
	平均值	15.6	1.97	1.70	72.5	0.827	0.245	7.06
	标准差	1.880	0.130	0.112	13.066	0.155	0.077	1.695
③湿陷性粉质黏土	最大值	19.8	2.04	1.66	88.1	0.887	0.392	7.97
	最小值	11.8	1.63	1.44	37.2	0.739	0.213	4.33
	平均值	15.7	1.85	1.60	62.1	0.808	0.290	6.09
	标准差	2.403	0.098	0.080	11.580	0.099	0.058	1.107
④粉质黏土	最大值	19.2	2.08	1.75	92.7	0.763	0.355	10.20
	最小值	14.5	1.76	1.54	51.5	0.552	0.154	4.97
	平均值	16.7	1.92	1.65	70.9	0.647	0.221	8.00
	标准差	1.747	0.091	0.076	10.479	0.075	0.062	1.778
⑤粉质黏土	最大值	22.7	2.07	1.78	93.5	0.727	0.302	9.35
	最小值	13.8	1.82	1.57	56.8	0.524	0.152	5.60
	平均值	18.6	1.97	1.66	79.1	0.636	0.225	7.47
	标准差	2.686	0.068	0.063	10.034	0.060	0.051	1.288

2 试夯试验概况

2.1 试夯方案

本次试夯共分6遍进行,布点方式为边长10 m的正方形中间插一点,第一遍夯点和第二遍夯点为主夯点,夯击能级为16 000 kN·m,第一遍夯点呈正方形布置,夯点间距10 m;第二遍夯点位于第一遍夯点所成正方形的中心,夯点间距10 m;第三遍夯点为插夯点,夯击能级为8 000 kN·m,第三遍夯点位于第一、二遍夯点所成正方形边线中间位置;第四遍为加固夯,夯击能级为4 000 kN·m,夯点位于前三遍夯点的原位置;第五、六遍为满夯,夯击能级为2 000 kN·m,击数2~3击,彼此锤印搭接1/4。夯点布置见图3,试夯试验参数见表2。

2.2 试夯过程

试夯前清理、平整场地,标出夯点位置、测量起夯面高程。夯机就位、夯锤对准夯点位置,测量夯前锤顶高程,将夯锤吊到预定高度脱钩自由下落进行夯击,测量锤顶高程,往复夯击,按表2中规定的夯击次数及控制标准,完成夯点的夯击。重复以上工序,完成第一遍全部夯点的夯击,用推土机将夯坑填平,测量场地高程。按上述程序逐次完成

全部夯击遍数后,采用低能级进行满夯,将场地表层松土进行夯实,并测量夯后场地高程变化。

2.3 试验检测

试夯完毕后,在场内地内开挖探井取样,并按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[13]对不同深度土样的物理和力学性质指标(包括干密度、压缩模量、压缩系数和湿陷系数等)进行测试,并按照《建筑地基检测技术规范》(JGJ 340—2015)^[14]进行重型动力触探试验,判定场地强夯处理效果。检测点布置见图3,其中每个检测点的具体检测内容、方法及要点如表3所示。

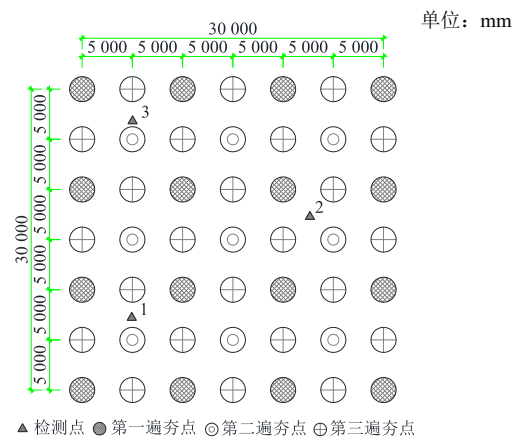


图3 夯点布置图

Fig. 3 Layout of tamp spots

表2 试夯试验参数

Table 2 Parameters of compaction trial test

试夯遍次	类别	能级/(kN·m)	夯锤参数		落距/m	夯点间距/m	最后两击平均夯沉量控制值/mm	最低击数控制值/击
			直径/m	锤重/kN				
一	点夯	16 000	2.80	845	21.0	10.0	250.0	12
二	点夯	16 000	2.80	845	21.0	10.0	250.0	12
三	点夯	8 000	2.35	446	20.0	10.0	200.0	10
四	加固夯	4 000	2.35	295	15.0	5.0	100.0	6
五、六	满夯	2 000	2.30	160	12.5	1/4 搭接	—	3

表3 检测内容、方法及要点

Table 3 Detection content, method and key points

检测内容	检测方法	检测要点
物理力学性质指标	常规土工试验	在试夯区内随机选点,开挖探井取样进行室内含水量试验、密度试验、压缩试验和湿陷性试验等,竖向取样间距均为1.0 m
判定强夯处理效果	重型动力触探试验	采用重型(N _{63.5})圆锥动力触探试验,试验采用自动落锤法,钻杆直径42 mm,试验从施工标高开始连续贯入,记录每贯入10 cm的锤击数

3 试验结果与分析

3.1 夯沉量与夯击次数关系

试夯区域的夯点击数及夯沉量统计如下:第一

遍夯坑平均深度为0.604 m,第二遍夯坑平均深度为0.549 m,第三遍夯坑平均深度为0.317 m,第四遍夯坑平均深度为0.206 m。第一遍与第二遍虽然能级相同,但夯坑深度减小,表明第二遍夯实的土体与第一遍相比可压缩性降低,地基土的密实度得

到了一定的提高。随着强夯遍数的提高, 达到最后两击平均夯沉量控制值所需的次数也随之降低。第一遍在 14 击后达到了夯沉量控制 25 cm 要求, 第二遍在 12 击后达到了夯沉量控制 25 cm 要求, 第三遍在 9 击后达到了夯沉量控制 20 cm 要求, 第四遍在 6 击后达到了夯沉量控制 10 cm 要求。夯击次数是确定的夯击能下所能取得最好加固效果的一个重要因素。因此在试夯方案设计中, 根据地基土的物理性质不同, 在规范中要求最后两击的夯沉量控制值的同时, 也应对最低击数控制值做要求, 以保证能达到加固地基土的目的。

3.2 地基土的基本物理参数指标分析

强夯后按照要求进行试验检测, 强夯前后试夯区地基土的主要物理力学性质指标统计结果见表

表 4 强夯前后的地基土物理力学性质指标统计结果

Table 4 Statistical results of physical and mechanical properties of foundation soil before and after dynamic compaction

工况	干密度 $\rho_d/(g/cm^3)$		孔隙比 e		压缩系数 a_{v1-2}/MPa^{-1}	
	范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
夯前	1.440~1.790	1.60	0.739~0.887	0.813	0.213~0.406	0.267
夯后	1.510~1.820	1.75	0.486~0.773	0.630	0.093~0.325	0.209

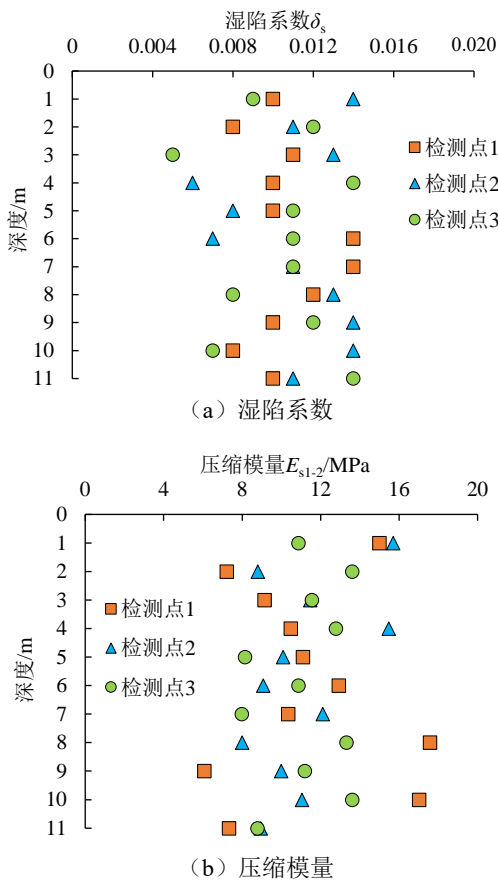


图 4 试夯区夯后湿陷系数、压缩模量变化散点图

Fig. 4 Scatter diagram of coefficient of collapsibility and compression modulus change after tamping in compaction trial area

4, 强夯后地基土湿陷性系数及压缩模量随深度变化结果如图 4 所示。由表 4 和图 4 结果分析可知, 经过强夯处理后, 终夯面下 11 m 深度范围内, 干密度提高了 9.4%, 压缩模量提高了 150.6%, 孔隙比降低约 22.5%, 压缩系数降低 21.7%, 在试夯区域深度 11 m 范围内, 夯后各土层湿陷系数均小于 0.015, 表明高能级强夯对基础底面以下的自重湿陷性土层的处理效果较好, 有效地消除了场地黄土的湿陷性。在进行主楼灌注桩设计时, 由原先自重湿陷性黄土场地的负摩阻变为了正摩阻, 有效减小了灌注桩的桩长, 取得了良好的经济性。但高能级强夯施工过程中地面震动较大, 应做好隔震措施以免对周边建筑产生影响。

3.3 强夯后地基土的均匀性

试夯区强夯后的重型动力触探试验曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 本次检测强夯区域终夯面下 11 m 深度范围内为第③层湿陷性粉质黏土, 上部土层厚度 9 m, 重型圆锥动力触探试验击数介于 4.2~14.3 击, 平均击数 10.1 击; 下部土层厚度 2 m, 重型圆锥动力触探试验击数介于 4~13 击, 平均击数 10 击。终夯面下 11 m 深度范围内地基土的重型圆锥动力触探试验击数介于 4~14.3 击, 变异系数为 0.23, 小于 0.30, 综合分析认为经强夯处理后, 本次检测强夯区终夯面下 11 m 深度范围内地基土较均匀。

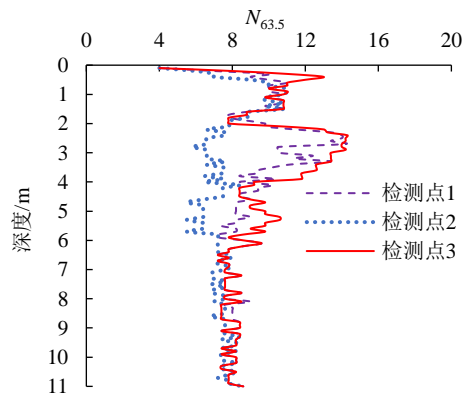


图 5 强夯后重型动力触探试验曲线

Fig. 5 Heavy dynamic penetration test curves after dynamic compaction

4 结论

本文通过在晋中某场地进行的高能级强夯处理深厚湿陷性黄土试验,形成以下结论:

(1) 16 000 kN·m 能级强夯处理时,第一遍、第二遍、第三遍、第四遍的单点击数分别为 14 击、12 击、9 击、6 击时,最后两击的平均夯沉量分别可控制在 25 cm、25 cm、20 cm、10 cm 以内。

(2) 经过 16 000 kN·m 能级强夯处理后,在终夯面下 11 m 范围内,干密度提高了 9.4%,压缩模量提高了 150.6%,孔隙比降低约 22.5%,压缩系数降低 21.7%,湿陷系数均小于 0.015,地基土的湿陷性基本消除。

(3) 夯后不同深度土层的动力触探击数介于 4.2~13.3 击,平均击数为 10 击。检测强夯区终夯面下 11 m 深度范围内地基土较均匀。

参考文献

- [1] 胡孟卿,李永伟.山西湿陷性黄土研究新进展[C]//中国建筑学会工程勘察分会.2014 全国工程勘察学术大会论文集.呼和浩特,2014:111-120.
HU Meng-qing, LI Yong-wei. New progress in collapsible loess research in Shanxi[C]//Architectural Society of China Engineering Survey Branch. Proceedings of the 2014 National Engineering Survey Academic Conference. Huhhot, 2014: 111-120.
- [2] 陈玮,梁建国,尚银生.晋中盆地 Q₂ 黄土湿陷性初步研究[C]//中国建筑学会工程勘察分会.2014 全国工程勘察学术大会论文集.呼和浩特,2014:99-110.
CHEN Wei, LIANG Jian-guo, SHANG Yin-sheng. Preliminary study on collapsibility of Q₂ loess in Jinzhong Basin[C]//Architectural Society of China Engineering Survey Branch. Proceedings of the 2014 National Engineering Survey Academic Conference. Huhhot, 2014: 99-110.
- [3] 徐文涛,张忠雄,董宝志,等.大厚度湿陷性黄土填方地基增湿强夯试验研究[J].水利与建筑工程学报,2023,21(1):151-159.
XU Wen-tao, ZHANG Zhong-xiong, DONG Bao-zhi, et al. Experimental study on wetting and dynamic compaction of large thickness collapsible loess fill foundation[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(1): 151-159.
- [4] 徐文涛,董宝志,于永堂,等.直接强夯法处理低含水量大厚度湿陷性黄土的效果分析[J].地基处理,2022,4(增刊1):134-143.
XU Wen-tao, DONG Bao-zhi, YU Yong-tang, et al. Effect analysis of direct dynamic compaction method in treating collapsible loess with low water content and large thickness[J]. Journal of Ground Improvement, 2022, 4(S1): 134-143.
- [5] 王家磊,韩进宝,马新岩,等.高能级强夯加固深厚杂填土地基现场试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1154-1163,1189.
WANG Jia-lei, HAN Jin-bao, MA Xin-yan, et al. Field test research on strengthening deep and thick backfilled foundation soil by 12 000 kN·m high energy dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
- [6] 朱彦鹏,师占宾,杨校辉.强夯法处理山区机场高填方地基的试验[J].兰州理工大学学报,2018,44(5):120-125.
ZHU Yan-peng, SHI Zhan-bin, YANG Xiao-hui. Experiment on high-filled foundation treatment of airport in mountain area with dynamic compaction method[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(5): 120-125.
- [7] 腊润涛,张荣.强夯法处理湿陷性黄土地基的效果评价[J].公路,2020,65(1):54-57.
LA Run-tao, ZHANG Rong. Effect evaluation of dynamic compaction method in treating collapsible loess foundation[J]. Highway, 2020, 65(1): 54-57.
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局.湿陷性黄土地区建筑标准:GB 50025—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Building Construction in Collapsible Loess Regions: GB 50025—2018[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑地基处理技术规范:JGJ 79—2012[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Ground Treatment of Buildings: JGJ 79—2012[S]. Beijing: China

- Architecture & Building Press, 2012.
- [10] 梁永辉, 王卫东, 冯世进, 等. 高填方机场湿陷性粉土地基处理现场试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1027-1035.
LIANG Yong-hui, WANG Wei-dong, FENG Shi-jin, et al. Field study on treatment of collapsible silt for high-fill airport project[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1027-1035.
- [11] 胡长明, 梅源, 王雪艳. 离石地区湿陷性黄土地基强夯参数的试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 2903-2909.
HU Chang-ming, MEI Yuan, WANG Xue-yan. Experimental research on dynamic compaction parameters of collapsible loess foundation in Lishi region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 2903-2909.
- [12] 郝东雷, 韩辅州, 赵晓磊, 等. 高能级强夯在处理湿陷性黄土地基的应用研究[C]//中国建筑学会工程勘察分会. 2016年全国工程勘察学术大会论文集(上册). 太原, 2016: 125-130.
HAO Dong-lei, HAN Fu-zhou, ZHAO Xiao-lei, et al. Application of high energy level dynamic compaction in collapsible loess foundation[C]//Architectural Society of China Engineering Survey Branch. Proceedings of the 2016 National Engineering Survey Academic Conference (Volume I). Taiyuan, 2016: 125-130.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑地基检测技术规范: JGJ 340—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Code for Testing of Building Foundation Soils: JGJ 340—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
-
- (上接第 11 页)
- LI Hao, LIU Dong-jia, HOU Chao-qun. A case study of the effect of dynamic compaction on miscellaneous fill foundation treatment[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2012, 35(6): 814-819.
- [16] 王家磊, 韩进宝, 马新岩, 等. 高能级强夯加固深厚杂填地基现场试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
WANG Jia-lei, HAN Jin-bao, MA Xin-yan, et al. Field test research on strengthening deep and thick backfilled foundation soil by 12 000 kN·m high energy dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(4): 1154-1163, 1189.
- [17] 万建军, 刘君, 孙虎. 淤泥质土上覆杂填地基的强夯试验研究[J]. 施工技术, 2016, 45(19): 57-60, 69.
WAN Jian-jun, LIU Jun, SUN Hu. Dynamic compaction test research of silty soil covered miscellaneous fill foundation[J]. Construction Technology, 2016, 45(19): 57-60, 69.
- [18] 江立群. 强夯置换碎石法在深厚杂填地基处理中的试验研究[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 92-94, 118.
JIANG Li-qun. Test study on deep miscellaneous fill foundation treatment based on dynamic replacement gravel method[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(9): 92-94, 118.